

АННОТАЦИЯ

Повышение уровня рационального использования энергетических ресурсов является одной из важнейших проблем современности. Одним из основных направлений решения этой проблемы в промышленности является использование побочных (вторичных) энергоресурсов. В статье предложена принципиальная схема энерготехнологической установки на базе газоперекачивающего агрегата компрессорной станции магистрального газопровода. Для неё разработана математическая модель макроуровня и выполнен численный анализ, показавший её энергетическую эффективность. Так, при транспортировке 33 млрд. м³ природного газа в год на компрессорной станции возможна выработка 2,98 ГВт·ч электрической энергии.

ANNOTATION

One of the most important problems of the present time is rise of the level of rational usage energy resource. Problem-solving in industry is usage of the secondary energy resource. In this article schematic circuit of energotechnological installation on the basis of the gas compressor unit of compressor station of the gas-main pipeline is proposed. For this schematic circuit macrolevel mathematical model is designed. The numerical analysis has showed energy efficiency of the circuit. Thus, it is possible to generate 2,98 electricity gigawatt-hour on compressor station, when transporting 33 billion m³ natural gas per year.

Повышение эффективности газоперекачивающего агрегата компрессорной станции магистрального газопровода

В. А. Седнин, д. т. н., профессор, заведующий кафедрой «Промышленная теплоэнергетика и теплотехника»,
А. А. Абразовский, м. т. н., Белорусский национальный технический университет

На настоящий момент в качестве привода газоперекачивающего агрегата (ГПА) на компрессорных станциях (КС) магистральных газопроводов, как правило, используются газотурбинные установки (ГТУ). Так, все КС белорусского участка магистрального газопровода «Ямал-Европа» оснащены газотурбинными ГПА на базе ГТУ единичной мощностью 16 МВт.

Целесообразность использования вторичных (побочных) энергетических ресурсов, образующихся на КС (далее — ВЭР), как для увеличения энергоэффективности газотранспортной системы, так и для энергообеспечения собственных нужд и сторонних потребителей была обоснована в работах [1–4]. Основными ВЭР на КС являются: теплота дымовых газов ГТУ; энергия избыточного давления дросселируемого топливного газа; теплота транспортируемого газа в системе охлаждения после ГПА; энергия теплового излучения нагретыми поверхностями газоходов и ГТУ в машинных залах КС; теплота системы охлаждения смазочного масла.

Для исследования была синтезирована технологическая схема комбинированной энерготехнологической установки (рис. 1) в составе ГПА, детандер-генераторной установки (ДГУ) и теплообменных аппаратов для охлаждения транспортируемого природного газа и воздуха, подаваемого в компрессор ГТУ.

Дымовые газы после газовой турбины разделяются на два потока. Первый направляется в теплообменный аппарат V для подогрева топливного газа, идущего на детандер. Второй — в теплообменный аппарат X для подогрева воды, идущей в абсорбционную холодильную машину. Холодная вода из абсорбционной холодильной машины направляется в теплообменные аппараты I, IX для охлаждения воздуха и транспортируемого природного газа соответственно. Электрическая энергия, вырабатываемая в ДГУ, идёт на собственные нужды КС и сторонним потребителям.

Указанная технологическая схема позволяет повысить эффективность работы как ГПА в летний период за счёт охлаждения воздуха, подаваемого в компрессор, так и линейного участка магистрального газопровода за счёт замены аппаратов воздушного охлаждения, а также осуществлять дополнительно выработку электрической энергии в ДГУ.

Для параметрической оптимизации была разработана математическая модель макроуровня [5, 6]. При составлении системы балансовых уравнений было принято, что транспортные элементы (связи) схемы идеальные, то есть в них отсутствуют энергетические и материальные потери (утечки и присосы), которые в технологических элементах также приняты нулевыми. Энергетические потери в транспортных элементах учитывались через коэффициенты потерь энергии в связываемых ими технологических элементах.

Сокращённая система балансовых уравнений математической модели имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} G_1 + G_4 - G_5 &= 0 \\ G_1 &= \alpha G_b^* G_4 \\ G_1 h_1 - G_1 h_2 + G_{18} h_{19} - G_{18} h_{18} &= 0 \\ G_1 h_2 - G_1 h_3 + \eta_4 N_{17} &= 0 \\ G_1 h_3 + \eta_3 G_4 h_4 - G_5 h_5 &= 0 \\ G_5 h_5 - G_5 h_6 - \frac{1}{\eta_4} N_{17} - \frac{1}{\eta_4} N_{16} &= 0 \\ G_7 h_{29} - G_7 h_7 + G_{10} h_{10} - G_{10} h_{13} &= 0 \\ G_8 h_8 - G_8 h_9 + \eta_1 N_{16} &= 0 \\ G_4 h_{13} - G_4 h_4 - \frac{1}{\eta_8} N_{14} &= 0 \\ \eta_8 N_{14} - N_{15} &= 0 \\ G_{11} h_{11} - G_{11} h_{12} + G_{20} h_{20} - G_{20} h_{21} &= 0 \\ G_{30} h_{30} - G_{30} h_{22} + G_{23} h_{23} - G_{23} h_{24} &= 0 \\ G_{23} h_{24} + G_{25} h_{25} - G_{23} h_{23} - G_{25} h_{26} - G_{27} h_{28} + G_{27} h_{27} &= 0 \\ G_{25} &= K_1 G_{23} \\ G_{25} &= K_2 G_{27} \\ G_{20} + G_{18} - G_{25} &= 0 \\ G_7 + G_{30} - G_5 &= 0 \\ G_{10} + G_{11} - G_8 &= 0 \\ G_{20} h_{20} + G_{18} h_{18} - G_{25} h_{25} &= 0 \end{aligned} \quad (1)$$

где: G_1 — расход воздуха, кг/с; G_4 — расход топливного природного газа, кг/с; G_5, G_7, G_{30} — расход дымовых газов, кг/с; G_8, G_{12} — расход транспортируемого газа, кг/с; G_{23}, G_{25}, G_{27} — расход воды, кг/с; α — коэффициент расхода воздуха; h_1, h_2, h_3 — энтальпия воздуха, кДж/кг; h_5, h_6, h_7, h_{30} — энтальпия дымовых газов, кДж/кг; h_8, h_9, h_{12} — энтальпия транспортируемого газа, кДж/кг; $h_{23}, h_{24}, h_{25}, h_{26}, h_{27}, h_{28}, h_{20}, h_{21}, h_{18}, h_{19}$ — энтальпия воды, кДж/кг; η — коэффициент потерь в окружающую среду, отнесённый к i -му элементу; $N_{14}, N_{15}, N_{16}, N_{17}$ — мощность, кВт.

Для проведения параметрической оптимизации в качестве критериев эффективности принимались коэффициент использования топлива b_t и удельная

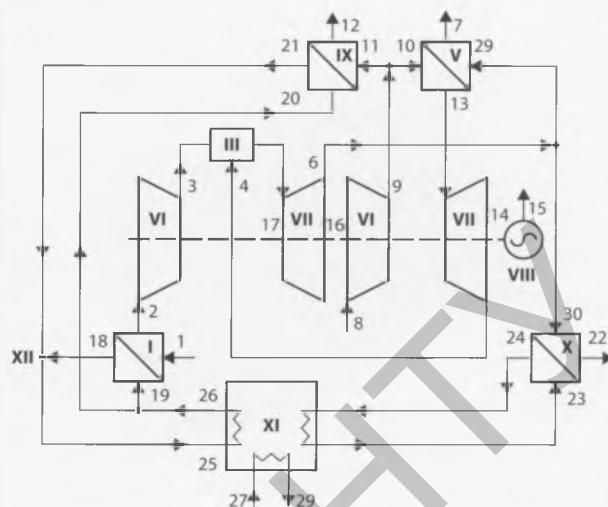


Рис. 1. Технологическая схема комбинированной энерготехнологической установки (I, V, IX, X — теплообменные аппараты; II — компрессор; III — камера сгорания; IV — газовая турбина; VI — нагнетатель; VII — детандер; VIII — генератор; XI — абсорбционная холодильная машина; 1, 2, 3 — воздух; 4, 8–13 — природный газ; 5–7, 22, 29, 30 — продукты сгорания; 14, 16, 17 — механическая энергия, 15 — электрическая энергия; 18–21, 25, 26 — вода холодного контура АБХМ; 23, 24 — вода горячего контура АБХМ; 27, 28 — вода из контура оборотного водоснабжения компрессорной станции)

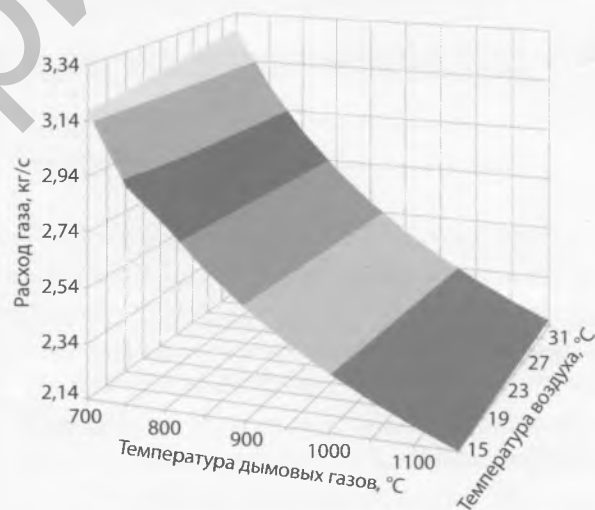


Рис. 2. Зависимость расхода газа от температуры продуктов сгорания перед турбиной и температуры наружного воздуха

электрическая мощность $e_{э}$. Функции цели записывались в виде:

$$b_t = \frac{B_t}{G_{\text{пр}}} = \frac{G_4}{G_8}; e_{э} = \frac{E_{э}}{G_{\text{пр}}} = \frac{E_{15}}{G_8},$$

где B_t — удельный расход топлива ГПА на «компрессию» транспортируемого природного газа, кг/кг;

E_{15} — удельная выработка электроэнергии ДГУ, кДж/кг (удельная мощность ДГУ, кВт/(кг/с)).

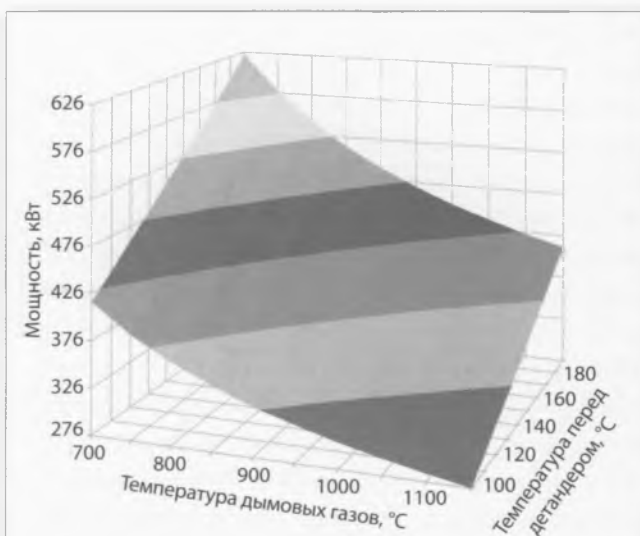


Рис. 3. Зависимость удельной электрической мощности от температуры продуктов сгорания перед турбиной и температуры топливного газа перед детандером

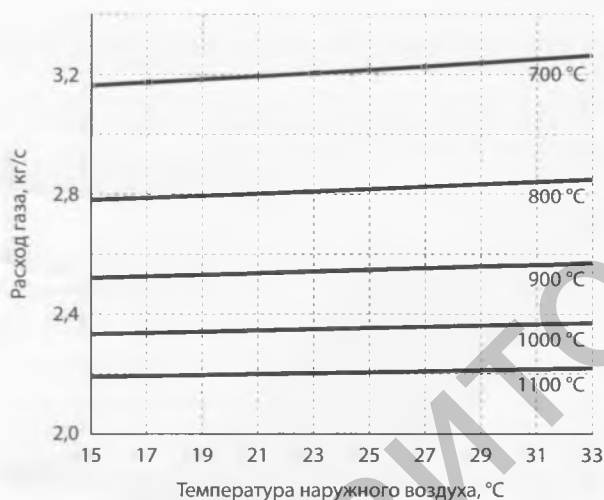


Рис. 4. Зависимость расхода газа от температуры наружного воздуха при различных значениях температуры продуктов сгорания перед турбиной и воздуха перед компрессором

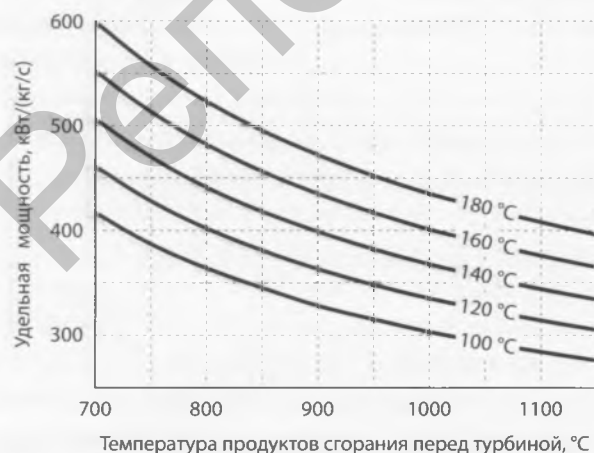


Рис. 5. Зависимость удельной электрической мощности от температуры дымовых газов перед турбиной при различных значениях температуры топливного газа перед детандером

В качестве управляемых переменных принималась температура: продуктов сгорания перед газовой турбиной, топливного газа перед детандером и воздуха, поступающего в компрессор. Диапазон их изменения соответственно: $T_5 = 700\text{--}1150\text{ }^{\circ}\text{C}$; $T_{13} = 100\text{--}190\text{ }^{\circ}\text{C}$; $T_2 = 15\text{--}35\text{ }^{\circ}\text{C}$. Основные результаты расчетов при расходе транспортируемого природного газа 1000 кг/с приведены на рис. 2–5.

В исследуемой области минимальный расход топливного газа равен $2,141\text{ кг/с}$ при $T_5 = 1150\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_2 = 15\text{ }^{\circ}\text{C}$, при этом электрическая мощность, дополнительно вырабатываемая ДГУ, составляет 412 кВт , а максимальное значение электрической мощности 623 кВт при $T_5 = 700\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_{13} = 190\text{ }^{\circ}\text{C}$ при удельном расходе природного газа $3,174\text{ кг/с}$.

Результаты численного анализа показывают, что предложенная схема комбинированной энерготехнологической установки энергетически эффективна. Для реальных условий при температуре продуктов сгорания перед газовой турбиной $T_5 = 900\text{ }^{\circ}\text{C}$ и температуре подогрева газа перед ДГУ $T_{13} = 190\text{ }^{\circ}\text{C}$ средняя дополнительная мощность удельной выработки составит 465 кВт , что при годовом объеме транспорта газа через КС 33 млрд. м^3 может составить до $2,98\text{ млн. кВт}\cdot\text{ч/год}$.

Литература

1. Несенчук А. П. Влияние теплоутилизационного «хвоста» компрессорной станции на эффективность работы газотурбинного привода с изобарным подводом теплоты и регенеративным теплоиспользованием / А. П. Несенчук [и др.] // Известия вузов. Энергетика. — 2013. — № 4. — С. 37–46.
2. Несенчук А. П. Энергоснабжение предприятия мясоперерабатывающей отрасли за счёт утилизационной теплоты ВЭР компрессорной станции магистрального газопровода / А. П. Несенчук, А. А. Абрамовский // Известия вузов. Энергетика. — 2013. — № 6. — С. 32–36.
3. Абрамовский А. А. Влияние технологических параметров магистрального газопровода на показатели работы компрессорной станции // Известия вузов. Энергетика. — 2014. — № 3. — С. 27–32.
4. Абрамовский А. А. Влияние утилизационной нагрузки привода компрессорной станции на параметры работы ГТУ // Известия вузов. Энергетика. — 2014. — № 4. — С. 24–29.
5. Седнин В. А. Параметрическая оптимизация парогазовой установки на биомассе / В. А. Седнин, А. И. Левшеня // Известия вузов. Энергетика. — 2014. — № 1. — С. 58–65.
6. Седнин В. А. Повышение эффективности энергетических установок на биомассе / В. А. Седнин, А. И. Левшеня // Энергия и Менеджмент. — 2014. — № 1. — С. 24–29.